

# Особенности отжига радиационных дефектов в кремниевых $p-n$ -структурах: роль примесных атомов железа

© Б.А. Комаров<sup>†</sup>

Институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Белоруссии,  
220072 Минск, Белоруссия

(Получена 20 октября 2003 г. Принята к печати 18 февраля 2004 г.)

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) исследовано образование комплексов (радиационный дефект)–(остаточная примесь в кремнии). Установлено, что термические обработки диффузионных Si  $p^+-n$ -переходов, облученных быстрыми электронами, приводят к активации остаточной примеси Fe и образованию комплексов FeVO (ловушка  $E_{0,36}$ ) и FeV<sub>2</sub> (ловушка  $H_{0,18}$ ). Формирование этих ловушек сопровождается ранней (100–175°C) стадией отжига основных вакансионных радиационных дефектов: А-центра (VO) и дивакансии (V<sub>2</sub>). Обнаруженные комплексы электрически активны, вводят новые электронный ( $E_{0,36}$ :  $E_t^e = E_c - 0.365$  эВ,  $\sigma_n = 6.8 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) и дырочный ( $H_{0,18}$ :  $E_t^h = E_v + 0.184$  эВ,  $\sigma_p = 3.0 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) уровни в запрещенную зону полупроводника и проявляют высокую термическую стабильность. Полагается, что наблюдавшимся ранее в литературе неизвестным дефектом с энергией  $E_t^e = E_c - (0.34-0.37)$  эВ, возникающим при отжиге облученных диффузионных Si  $p^+-n$ -переходов, является комплекс FeVO.

## 1. Введение

Проблема контроля быстро диффундирующих примесей продолжает оставаться одной из наиболее актуальных в кремниевой микро- и нанoeлектронике. Эти примеси, и в первую очередь атомы переходных металлов (Fe, Cu, Ni и др.), могут вводиться в заметных концентрациях на высокотемпературных технологических операциях (ВТО) [1–3]. Благодаря высокой подвижности они эффективно взаимодействуют с различного рода несовершенствами решетки, с формированием в ряде случаев новых электрически активных центров. Можно ожидать, что присутствие переходных металлов в кремниевых структурах, прошедших ВТО, будет проявляться аналогичным образом и в процессах образования и отжига радиационных дефектов (РД).

Ранние исследования по термической стабильности РД, введенных облучением  $\gamma$ -квантами или быстрыми электронами, установили, что такие основные РД как А-центр (VO) и дивакансия (V<sub>2</sub>) стабильны в зонном кремнии (FZ-Si) до температуры  $T_{\text{ann}} \approx 350^\circ\text{C}$ , а в кремнии, выращенном по методу Чохральского (Cz-Si) дивакансии V<sub>2</sub> стабильны до  $250^\circ\text{C}$  и отжигаются без образования в заметных концентрациях новых электрически активных дефектов [4–8].

Как показали последующие исследования, отжиг А-центра в диффузионных  $p-n$ -переходах может носить сложный характер и сопровождаться появлением новой электронной ловушки, природа которой была неизвестной [9–11]. Так, Кимерлинг [9] наблюдал появление и исчезновение электронной ловушки с уровнем  $E_c - 0.35$  эВ ( $E_{0,35}$ ) в облученных электронами (1 МэВ) диффузионных переходах в области температур отжига 150–300°C при монотонном отжиге А-центра выше 100°C. Брозертон и Брэдли [10] при исследовании РД, введенных облучением быстрыми электрона-

ми (12 МэВ), наблюдали аналогичный характер отжига А-центра с генерацией ловушки с уровнем  $E_{0,36}$ . В барьерах Шоттки генерация дефектов  $E_{0,36}$  не обнаружена. Барнс [11] при исследовании отжига РД, введенных  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со в диффузионные переходы, обнаружил раннюю стадию (при  $T_{\text{ann}} \geq 170^\circ\text{C}$ ) частичного отжига ловушки  $E_{0,18}$  (VO) с одновременной генерацией в равной концентрации новой электронной ловушки  $E_{0,35}$ . В дальнейшем отжиг А-центра и ловушки  $E_{0,35}$  проходил одновременно до температур  $T_{\text{ann}} \geq 370^\circ\text{C}$ . Высказано предположение, что ранняя стадия частичного отжига А-центра обусловлена взаимодействием VO с подвижными дефектами или примесью с последующей модификацией А-центра в более сложный комплекс.

Аномально ранняя стадия ( $T_{\text{ann}} \approx 120^\circ\text{C}$ ) полного отжига дефекта VO обнаружена как в монокристаллах Cz-Si, прошедших предварительную температурную обработку (ПТО) [12,13], так и в  $p-n$ -переходах [14–17]. Считается возможным участие остаточных технологических примесей быстро диффундирующих металлов (Fe, Ni и др.) в процессах дефектообразования в кристаллах, прошедших ПТО [12,13].

Ранняя стадия отжига VO ( $T_{\text{ann}} > 100^\circ\text{C}$ ) в  $p-n$ -переходах сопровождалась появлением в равной концентрации новой электронной ловушки с уровнем  $E_{0,37}$  [14] или  $E_{0,34}$  [15]. При  $T > 200^\circ\text{C}$  наблюдалась обратная перестройка дефекта с уровнем  $E_{0,34}$  в А-центр. Предполагалось участие неизвестного подвижного дефекта в формировании уровня  $E_{0,34}$ .

В работе [16] установлено, что взаимодействие Fe с РД в  $p-n$ -переходах приводит к ранней стадии ( $T_{\text{ann}} \approx 100^\circ\text{C}$ ) отжига А-центра с одновременным введением в равной концентрации электронной ловушки  $E_{0,36}$ , которая была идентифицирована как комплекс FeVO. Отмечалось наличие ранней стадии отжига дивакансии.

Аномальные ранние стадии отжига А-центра и дивакансии, а также появление новых ловушек для электро-

<sup>†</sup> E-mail: murin@ifftp.bas-net.by

нов ( $E_{0.36}$ ) и дырок ( $H_{0.18}$ ) обнаружены при исследовании образования и отжига РД в слабо легированной базе Si  $p^+ - n$ -переходов [17].

Таким образом, цель настоящей работы заключалась в установлении взаимодействия фоновой примеси с РД и ее природы путем исследования особенностей отжига РД в диффузионных Si  $p - n$ -переходах.

## 2. Методика измерения и экспериментальные результаты

Объектами исследования были Si  $p^+ - n$ -структуры, изготовленные диффузией бора ( $T_{\text{dif}} = 1150^\circ\text{C}$ ) в  $n$ -Cz-Si(P) с  $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (структуры I) и  $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  (структуры II). Образцы облучались быстрыми электронами ( $E = 7 \text{ МэВ}$ ,  $F = 3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) при комнатной температуре. Спектроскопия глубоких уровней (DLTS) проводилась на установке DLS-83D фирмы Semitrap [18].

Основной метода емкостной спектроскопии глубоких уровней является связь изменения барьерной емкости  $p - n$ -перехода или диода Шоттки во времени с зависящей от температуры скоростью термической эмиссии носителей заряда  $e_n(T)$  с глубокого уровня дефекта при изменении напряжения смещения на структуре. Эта связь устанавливается соотношением  $\Delta C(t) = \Delta C(0) \exp[-e_n(T)t]$ , где  $\Delta C(0)$  — изменение барьерной емкости в начальный момент времени  $t = 0$ . В спектрометре DLS-83D импульс заполнения ловушки периодически повторяется с частотой  $\nu$  и используемые емкостные изменения  $\Delta C(t)$  усиливаются синхронным усилителем и интегрируются с квадратичной волновой весовой функцией. Для дискретного центра температура максимума сигнала  $T_{\text{peak}}$ , скорость термической эмиссии и частота повторения заполняющих импульсов  $\nu$  связаны простым соотношением  $e_n(T_{\text{peak}}) = 2.17\nu$ . Проводя необходимое количество термосканов при различных частотах, получают соответствующее количество ( $i$ ) пар  $T_{\text{peak}}^{(i)} - e_n^{(i)}$ , используемых для стандартной процедуры построения графика Аррениуса. Концентрация дефекта  $N_i$  равна амплитуде пика  $\Delta C(T_{\text{peak}})$ , умноженной на коэффициент корреляции данной установки. Определение других параметров ловушки далее идет по пути, сложившемуся в методах емкостной спектроскопии дефектов.

В контрольных (необлученных) образцах в верхней половине запрещенной зоны (33) ловушек электронов обнаружено не было. В нижней половине 33 в структурах II наблюдалась полоса с максимумом в районе температуры 225 К ( $H_{0.38}$ ,  $N_{0.38} \geq 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ).

Как энергетический спектр, так и эффективность образования основных РД практически не отличались в структурах I и II. На рис. 1 представлен типичный DLTS-спектр радиационных дефектов и его трансформация на начальных этапах изохронного отжига структур II. Облучение приводило к формированию в верхней половине 33 ловушек электронов:  $E_1$

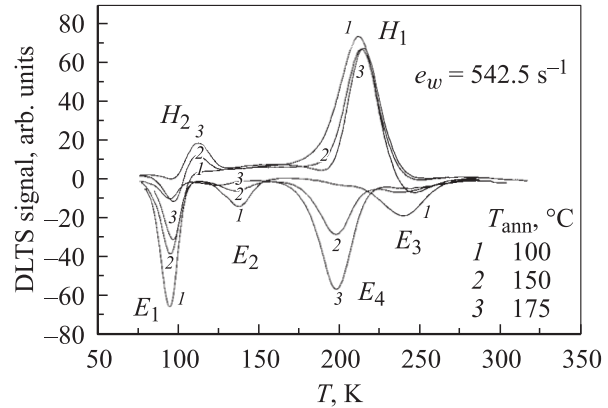


Рис. 1. DLTS-спектры радиационных дефектов в Si  $p^+ - n$ -переходах (структуры II), облученных быстрыми электронами ( $E = 7 \text{ МэВ}$ ,  $F = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), и их трансформация при начальных термических обработках.

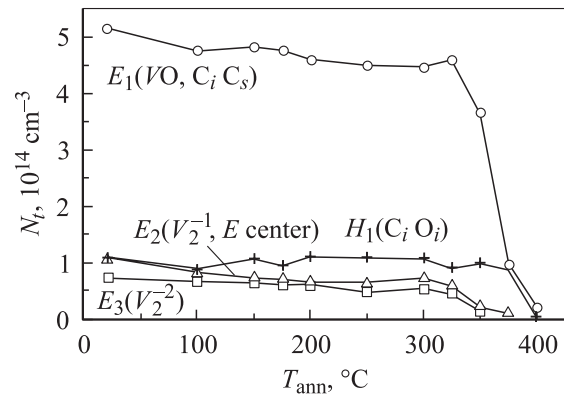
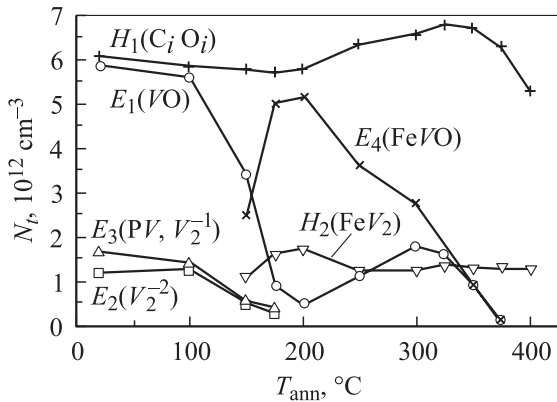


Рис. 2. Отжиг радиационных дефектов в Si  $p^+ - n$ -переходах (структуры I), облученных быстрыми электронами с  $E = 7 \text{ МэВ}$ ,  $F = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

(0.166 эВ,  $\sigma_n = 1.1 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ; А-центр,  $C_i C_s$ ) [4–11,19],  $E_2$  (0.241 эВ,  $\sigma_n = 5.0 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ;  $V_2^{-2}$ ) [6,7,9],  $E_3$  (0.424 эВ,  $\sigma_n = 2.1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ;  $V_2^{-1}$ , Е-центр) [6–9]. В нижней половине 33 вводилась ловушка дырок  $H_1$  (0.363 эВ,  $\sigma_p = 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ;  $C_i O_i$ ) [20].

Существенные отличия в поведении введенных РД в структурах I и II наблюдались при проведении изохронного (30 мин) отжига в интервале температур 100–400°C.

Для структур I (с более высоким уровнем легирования базы) (рис. 2) отжиг основных РД (А-центров и дивакансий) проходил в одну стадию ( $T_{\text{ann}} = 300 - 350^\circ\text{C}$ ). Как видно из рисунка, ловушка  $E_1$  стабильна до температур 350°C, вклад комплекса  $C_i C_s$ , отжиг которого проходит при  $T_{\text{ann}} \approx 250^\circ\text{C}$  [19], в концентрацию дефектов  $E_1$  мал. Поэтому характер отжига дефекта с уровнем  $E_1$  определяется термической стабильностью А-центра. Образование новых электрически активных дефектов в заметных концентрациях не обнаружено. Кроме того, отметим термическую стабильность до 350°C уровней



**Рис. 3.** Отжиг радиационных дефектов в Si  $p^+$ - $n$ -переходах (структуры II), облученных быстрыми электронами с  $E = 7$  МэВ,  $F = 3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ . Энергии уровней:  $E_1 = E_c - 0.166$  эВ,  $E_2 = E_c - 0.241$  эВ,  $E_3 = E_c - 0.424$  эВ,  $E_4 = E_c - 0.365$  эВ,  $H_1 = E_v + 0.363$  эВ,  $H_2 = E_v + 0.184$  эВ.

дивакансии. Концентрация  $E$ -центров (PV) в наших структурах была незначительной.

Для слабо легированной базы (структуры II) (рис. 1, 3) наблюдается ранняя ( $T_{ann} = 100-175^\circ\text{C}$ ) стадия отжига ловушек  $E_1(VO)$ ,  $E_2(V_2^{-2})$  и  $E_3(V_2^{-1})$ . При этом происходит формирование новых ловушек  $E_4$  (0.365 эВ,  $\sigma_n = 6.8 \cdot 10^{-15}$  см $^2$ ) и  $H_2$  (0.184 эВ,  $\sigma_p = 3.0 \cdot 10^{-15}$  см $^2$ ). Отжиг центра  $E_1$  сопровождается накоплением в такой же концентрации ловушки  $E_4$ , которому сопутствует частичное восстановление ловушки  $E_1$  (стадия „отрицательного“ отжига). В дальнейшем отжиг ловушек  $E_1$  и  $E_4$  проходит синхронно вплоть до  $350^\circ\text{C}$ . Отжиг ловушек  $E_2$  и  $E_3$  (дивакансий) совпадает с появлением в равной концентрации новой ловушки  $H_2$ , стабильной до  $400^\circ\text{C}$  (далее отжиг не проводился). Стадия формирования ловушки  $H_2$  хорошо коррелирует по температуре со стадией образования ловушки  $E_4$ .

Заметных отличий в характере отжига РД межузельного типа (комплексов  $C_iO_i$ ) в структурах I и II не наблюдалось. Однако отметим, что для структур II имеется некоторое увеличение концентрации ловушки  $H_1$  при отжиге ловушки  $E_4$ . Такой отжиг ловушки  $H_1$  связан, по нашему мнению, с трансформацией других углеродосодержащих дефектов в комплекс  $C_iO_i$ , а не диссоциацией ловушки  $E_4$ .

### 3. Обсуждение

Выше высказано предположение о взаимодействии остаточных технологических быстро диффундирующих примесей с РД. Хорошо известен эффект пассивации водородом РД в кремнии. Однако отсутствие водородосодержащих дефектов (VOH [21], MHR [22–24]) в наших структурах и близость параметров новых ловушек,

определенных в данной работе, с литературными данными [16] позволяют нам рассматривать в дальнейшем взаимодействие железа с радиационными дефектами.

#### 3.1. Роль железа

Железо является важной быстро диффундирующей технологической примесью переходных металлов, которая может непреднамеренно, но эффективно вводиться как на этапе выращивания кристаллов, так и при изготовлении полупроводниковых приборов [1–3, 16, 25–28]. Закалка после ВТО приводит к тому, что основная часть электрически активного железа находится в межузельном положении ( $Fe_i$ ) в кристалле и является дырочной ловушкой с донорным уровнем у валентной зоны  $E_v + (0.38-0.41)$  эВ. При обычных способах очистки, согласно данным ЭПР, концентрация  $Fe_i^0$  в кристалле может достигать величины  $\sim 10^{14}$  см $^{-3}$ . Как показали исследования [25, 26], твердый раствор Si-Fe более стабилен в  $n$ -Si, чем в  $p$ -Si. Это связывают с тем, что в  $p$ -Si межузельные атомы железа заряжены положительно и высока вероятность кулоновского взаимодействия с акцепторной примесью по типу  $Fe_i^+ - B^-$  [2, 3]. В  $n$ -Si железо находится в нейтральном состоянии и кулоновское взаимодействие с дефектами акцепторного типа отсутствует [26].

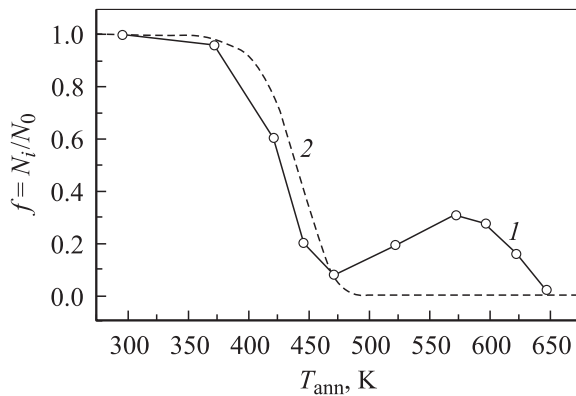
Детальное исследование кинетики распада твердого раствора железа в  $n$ -Cz-Si емкостными методами проведено в работе [26]. При изохронном отжиге в области температур  $50-200^\circ\text{C}$  заметное изменение концентрации железа наблюдалось при  $T_{ann} \geq 130^\circ\text{C}$ , а при  $200^\circ\text{C}$  уровни железа отжигались полностью. Установленная стадия отжига уровней  $E_v + 0.41$  эВ находится в хорошем согласии с исследованиями отжига состояния  $Fe_i^0$  в Si методом ЭПР [27, 28].

Ранние исследования термической стабильности  $Fe_i$  [25] в присутствии РД показали, что в облученных кристаллах наблюдается конверсия при  $T_{ann} = 100^\circ\text{C}$  уровня  $E_c - 0.17$  эВ (VO) в уровень  $E_c - 0.30$  эВ, и данная конверсия имела место только в образцах, насыщенных железом.

На рис. 4 представлен фрагмент ранней стадии отжига А-центра (кривая I), а также стадии отрицательного отжига, полученного нами [17]. Экспериментальная кривая ускоренного отжига хорошо описывается выражением

$$f = \exp[-2.8 \cdot 10^5 t \exp(-0.78/kT_i)], \quad (1)$$

где  $f = N_i/N_0$  — доля неотожженных дефектов,  $N_i$  — концентрация дефектов VO при температуре отжига  $T_{ann} = T_i$ ,  $N_0$  — концентрация VO до отжига,  $t = t_{ann}$  — длительность изохронного отжига,  $E_a = 0.78$  эВ — энергия активации отжига и предэкспоненциальный множитель  $\beta = 2.8 \cdot 10^5$  с $^{-1}$ . В рамках представления о том, что ранняя стадия отжига А-центра формируется захватом подвижных межузельных атомов железа комплексом VO, параметры процесса выбраны как для



**Рис. 4.** Фрагмент ранней стадии отжига дефектов VO. 1 — экспериментальные данные, 2 — расчет доли неотожженных дефектов VO по формуле (1). В целях наглядности на рисунке не показаны стадии формирования и отжига ловушки  $E_{0.36}$  ( $T = 150\text{--}350^\circ\text{C}$ ).

отжига  $\text{Fe}^+$  в Si [26] (расчет представлен кривой 2 на рис. 4). В пользу данного механизма свидетельствует следующее:

1) наличие ранней стадии отжига А-центра и конверсия ловушки  $E_{0.17} \rightarrow E_{0.3}$  [25],  $E_{0.34}$  [15],  $E_{0.36}$  [16,17],  $E_{0.37}$  [14];

2) такая конверсия уровней могла наблюдаться в кристаллах, содержащих атомы железа [16,25].

Экспериментальный разброс в положении энергетического уровня ловушки после конверсии мы связываем с использованием различных методов исследования (эффект Холла, время жизни неравновесных носителей заряда, фотосемкость, изотермическая релаксация емкости, DLTS). При этом природа явления, по нашему мнению, одна во всех рассмотренных работах.

Наиболее вероятно, что ловушка  $E_4$  ( $E_{0.36}$ ), образование которой наблюдалось в наших структурах (рис. 1,3), также является комплексом FeVO. Об этом свидетельствует как идентичность параметров центров  $E_{0.36}$  работ [16,17], так и схожее их поведение при отжиге. Кроме того, проявление в исходных (необлученных) образцах ловушки  $H_{0.38}$  также свидетельствует о присутствии межузельных атомов железа (донорный уровень  $\text{Fe}_i$ , согласно [3], расположен вблизи энергии  $E_v + 0.38$  эВ).

На основе изложенных фактов можно сделать следующий вывод. Наблюдаемые нами ранняя стадия отжига ловушки  $E_1$  (VO) и формирование новой электронной ловушки  $E_{0.36}$  (FeVO) связаны с захватом подвижных атомов  $\text{Fe}_i$  комплексом VO. Дополнительным свидетельством в пользу такого процесса может служить близость значения энергии активации ( $E_a = 0.78$  эВ) для ранней стадии отжига А-центра, полученного нами, с величиной  $E_a \approx 0.7$  эВ [15] и данными работы [26].

Обращаем внимание на совпадение параметров ловушки  $E_4$  ( $E_{0.36}$ ) настоящей работы с параметрами ловушки  $E_{0.36}$  (0.363 эВ,  $\sigma_n = 1.4 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) в работе [10],

ловушки  $E_{0.36}$  (0.36 эВ,  $\sigma_n = 4 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) в работе [16] и ловушки  $E_{0.34}$  (0.34 эВ,  $\sigma_n = 10^{-15}$  см<sup>2</sup>) в работе [15], а также наличие общей стадии возникновения и отжига при  $T_{\text{ann}} \approx 150\text{--}350^\circ\text{C}$  [9–11,15–17] для ловушек  $E_{0.36}$ ,  $E_{0.34}$ . Кроме того, отметим присутствие частичной [11] или полной ранней стадии отжига А-центра и его конверсию в новую ловушку  $E_{0.3-0.37}$  [11,14–17,25]. Заметим также, что данные явления наблюдались в диффузионных переходах, часть из которых специально легировались железом. Все это говорит в пользу того, что природа нового дефекта во всех представленных случаях одна и та же — комплекс FeVO.

### 3.2. Отжиг дивакансии

Дивакансия вносит в верхнюю половину запрещенной зоны кремния два уровня  $E_c - 0.23$  и  $E_c - 0.39$  эВ. В случае электронного облучения оба уровня дивакансии вводятся с одинаковой скоростью ( $\sim 0.01$  см<sup>-1</sup>) и отжигаются на одной стадии  $\sim 330^\circ\text{C}$  в зонном кремнии. Отжиг может быть описан одной экспонентой с энергией активации 1.47 эВ и предэкспоненциальным множителем  $\beta = 1.1 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> [29].

Современные исследования термической стабильности дивакансии методом LDLTS показали [30], что в  $n\text{-Cz-Si}$  отжиг  $V_2^{-2}$  при  $T_{\text{ann}} > 170^\circ\text{C}$  сопровождается перестройкой последней в комплекс  $V_2\text{O}$  с равной концентрацией и близкими параметрами по термической эмиссии электронов и стабильного до  $T_{\text{ann}} \approx 300^\circ\text{C}$ .

В работе [16] при исследовании взаимодействия Fe с РД в  $p\text{-}n$ -переходах отмечалась ранняя ( $T_{\text{ann}} > 80^\circ\text{C}$ ) стадия отжига дивакансии, однако при этом новых ловушек не обнаружено.

В отличие от работы [16], где ловушки в нижней половине запрещенной зоны не исследовались, нами наблюдалась новая ловушка  $H_2$  (рис. 1,3). Ее образование хорошо коррелирует по температуре с ранним отжигом дивакансии и с генерацией ловушки  $E_4$  (FeVO). По-видимому, дивакансия является также эффективным центром захвата для подвижных атомов железа.

Исследование связанных с железом центров в кремнии [28] методом ЭПР показало, что дивакансия может образовывать комплекс  $\text{Fe}_2V_2$  — два межузельных атома Fe вблизи с  $V_2$ . Комплекс такой конфигурации отжигается при температуре  $250^\circ\text{C}$ .

Однако ловушка  $H_2$  стабильна до температур отжига ( $400^\circ\text{C}$ ), проведенных в настоящей работе. Мы не исключаем, что данная ловушка  $H_2$  может быть связана с образованием комплекса  $\text{Fe}_iV_2$ , который, возможно, более стабильный, чем комплекс  $\text{Fe}_2V_2$ .

В заключение отметим следующее. В представленных работах [9–11,14–17] концентрация основной легирующей примеси и соответственно РД были  $N \leq 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Поэтому мы полагаем, что в обычных диффузионных или специально легированных железом Si  $p\text{-}n$ -переходах, когда концентрации РД соизмеримы с концентрацией железа, следует ожидать ускоренного отжига

А-центра и дивакансии с образованием новых термо-стабильных дефектов при соответствующих тепловых режимах обработки или эксплуатации промышленных структур в полях повышенной радиации. Такой ускоренный отжиг вакансионных комплексов  $VO$  и  $V_2$ , а также образование новых ловушек  $E_{0.36}$  и  $H_{0.18}$  являются важным индикатором взаимодействия остаточной примеси  $Fe_i$  с РД, а указанные изменения в спектре РД могут приводить к деградации электрических характеристик промышленных приборов.

#### 4. Заключение

В облученных кристаллах  $n-Cz-Si$ , содержащих фоновую или специально введенную концентрацию  $Fe_i$ , наблюдается взаимодействие радиационных дефектов вакансионного типа с подвижными атомами железа. Этот процесс взаимодействия проявляется в эксперименте наличием аномально ранней стадии отжига ( $T_{ann} = 100-150^\circ C$ ) А-центра и дивакансии с образованием новых электронных  $E_{0.36}$  ( $E_t = E_c - 0.365$  эВ,  $\sigma_n = 6.8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ) и дырочных  $H_{0.18}$  ( $E_t = E_v + 0.184$  эВ,  $\sigma_p = 3.0 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ) ловушек.

Оценена энергия активации ранней стадии отжига А-центра  $E_a \approx 0.8$  эВ. Ловушка  $E_{0.36}$  идентифицирована как комплекс  $Fe_iVO$ . Установлено, что отжиг этого комплекса сопровождается стадией отрицательного отжига ловушки  $E_{0.17}$ . Высказано предположение, что неоднократно наблюдаемое в литературе образование ловушек  $E_{0.34-0.37}$  также связано с взаимодействием подвижных атомов  $Fe_i$  с А-центром.

Впервые обнаруженная ловушка  $H_{0.18}$  идентифицирована как комплекс дивакансии с атомами железа  $Fe_iV_2$ . Показано, что дефект  $H_{0.18}$  является одним из наиболее термостабильных РД в кремнии.

Выражаем благодарность Ф.П. Коршунову за проявленный интерес к работе и Л.И. Мурину за полезную дискуссию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф01-314).

#### Список литературы

- [1] B.O. Kolbensen, H. Cerva, G. Zoth. Sol. St. Phenomena, **76-77**, 1 (2001).
- [2] A.A. Istratov, E.R. Weber. Appl. Phys., **A66** (1), 123 (1998).
- [3] A.A. Istratov, H. Hieslmair, E.R. Weber. Appl. Phys., **70** (2), 489 (2000).
- [4] G.D. Watkins, J.W. Corbett. Phys. Rev., **121** (4), 1001 (1961).
- [5] J.W. Corbett, G.D. Watkins, R.M. Chrenko, R.S. McDonald. Phys. Rev., **121** (4), 1051 (1961).
- [6] G.D. Watkins, J.W. Corbett. Phys. Rev., **138**, A543 (1965).
- [7] L.J. Cheng, J.C. Corelli, J.W. Corbett, G.D. Watkins. Phys. Rev., **152**, 761 (1966).
- [8] J.W. Walker, C.T. Sah. Phys. Rev. B **7** (10), 4587 (1973).
- [9] L.C. Kimerling. Inst. Phys. Conf. Ser., N 31, 221 (1977).

- [10] S.D. Brotherton, P.J. Bradley. Appl. Phys., **53** (8), 5720 (1982).
- [11] C.E. Barnes. J. Electron. Mater., **8** (4), 437 (1979).
- [12] Л.Ф. Макаренко, В.П. Маркевич, Л.И. Мурин, В.Д. Ткачев. Докл. АН БССР, № 11, 988 (1981).
- [13] И.Ф. Медведева, Л.Ф. Макаренко, В.П. Маркевич, Л.И. Мурин. Вести АН БССР. Сер. физ.-мат. наук, № 3, 19 (1991).
- [14] Л.С. Берман, В.Б. Шуман. ФТП, **10** (9), 1755 (1976).
- [15] П.В. Кучинский, В.М. Ломако, Л.Н. Шахлевич. Письма ЖЭТФ, **45** (7), 350 (1987).
- [16] Z. You, M. Gong, J. Chen, J.W. Corbett. J. Appl. Phys., **63** (2), 324 (1988).
- [17] Б.А. Комаров, И.Ф. Медведева, Л.И. Мурин, В.Е. Гусаков, П.В. Кучинский, J.L. Lindstrom. Матер. IV межд. конф. по взаимодействию излучений с твердым телом (Минск, 2001) с. 161.
- [18] G. Ferenczi, J. Boda, T. Pavelka. Phys. St. Sol. (a), **94**, K119 (1986).
- [19] L.W. Song, B.W. Benson, G.D. Watkins. Appl. Phys. Lett., **51** (15), 1155 (1987).
- [20] L.I. Murin. Phys. St. Sol. (a), **101**, K107 (1987).
- [21] P. Pellegrino, P. Levegue, J. Lalita, A. Hallen, C. Jagadish, B.G. Svensson. Phys. Rev. B, **64**, 195 211 (2001).
- [22] B.A. Komarov, V.P. Markevich, L.I. Murin, T. Sekiguchi. In: Proc. 23rd Int. Conf. Physics Semicond., ed. by M. Scheffler, R. Zimmermann (World Scientific, Singapore, 1996) p. 2593.
- [23] И.Ф. Медведева, Л.И. Мурин, В.П. Маркевич, Б.А. Комаров. Вопросы атомн. науки и техники. Сер. Радиационное материаловедение, **79** (2), 48 (2001).
- [24] Б.А. Комаров. Вопросы атомн. науки и техники. Сер. Радиационное материаловедение, **79** (2), 43 (2001).
- [25] А.А. Золотухин, А.К. Коваленко, Л.С. Милевский. ФТТ, **13** (10), 3119 (1971).
- [26] А.А. Лебедев, Б.М. Урунбаев. ФТП, **15** (3), 612 (1981).
- [27] К.П. Абдурахманов, Б.А. Котов, Й. Крейсль, А.А. Лебедев, Ш.Б. Утамурадова. ФТП, **19** (2), 349 (1985).
- [28] S.H. Muller, G.M. Tuynman, E.G. Sieverts, C.A. Ammerlaan. Phys. Rev. B, **25** (1), 25 (1982).
- [29] А.В. Васильев, С.А. Смагулова, Л.С. Смирнов. ФТП, **20** (3), 561 (1986).
- [30] V.P. Markevich, A.R. Peaker, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, J.L. Lindstrom. J. Phys.: Condens. Matter., **15**, S2779 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

#### Peculiarities of the radiation defect annealing in Si $p^+ - n$ -junctions: role of the Fe atoms

B.A. Komarov

Institute of Solid State and Semiconductor Physics,  
220072 Minsk, Belarus